

INFLUENCIA DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA ADHESIVIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS

Ignacio Pérez

Universidade da Coruña, E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
A Coruña, España

iperez@udc.es

Ana R. Pasandín

Universidade da Coruña, E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
A Coruña, España

arodriguezpa@udc.es

RESUMEN

En esta comunicación se analiza el efecto del agua sobre la durabilidad de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Con el fin de evaluar este comportamiento se realizaron ensayos de resistencia a tracción indirecta. Las mezclas ensayadas se elaboraron con unos porcentajes de áridos reciclados del 0%, 20%, 40% y 60%. Se utilizaron dos tipos de áridos naturales: Esquisto y caliza dolomítica. Se comprobó que al aumentar el porcentaje de áridos reciclados se produce una disminución de la resistencia conservada de las mezclas bituminosas.

Con el fin de analizar este fenómeno se realizó un **ANOVA** de tres factores, usando como variable dependiente los resultados de la resistencia a tracción indirecta. Los factores estudiados fueron el porcentaje de áridos reciclados (0%, 20%, 40% y 60%), el estado de humedad (seco, mojado) y el tipo de árido natural (esquisto, caliza). De los resultados del **ANOVA** se deduce que el factor que más afecta a las resistencias es el estado de humedad (seco, mojado) de las probetas. También, el porcentaje de árido reciclado afecta a la resistencia a tracción indirecta, sobre todo en estado seco. Asimismo, el tipo de árido natural afecta a la resistencia a tracción indirecta, aunque su importancia es mucho menor.

Las probetas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con diferentes porcentajes de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición y con áridos naturales de cantera tienen una mala adhesividad. Esta mala adhesividad influiría negativamente en la durabilidad de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados.

INTRODUCCIÓN

Los residuos constituyen uno de los problemas ambientales más graves de las sociedades modernas, en particular de las más avanzadas e industrializadas. Se trata de un problema en aumento, que no deja de agravarse debido al creciente volumen generado y a la estrecha relación de paralelismo entre los niveles de renta y de calidad de vida y el volumen de residuos que se genera. Aunque se han realizado un gran número de investigaciones sobre la utilización de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición como materiales granulares (Bennert et al, 2000; Poon y Chan, 2006) y como materiales tratados con conglomerantes hidráulicos (Hansen,

1992; Cross et al, 1996; Rahshir y Barai, 2006), hasta ahora un limitado número de investigaciones han sido realizadas sobre el uso de estos residuos en mezclas bituminosas.

En este sentido, Pérez et al (2007) observaron que las mezclas bituminosas en caliente elaboradas con áridos reciclados ofrecen una mayor resistencia a la deformación permanente que las mezclas que contienen solamente áridos naturales. También, observaron que las mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados son más rígidas que las convencionales y, además, que en las mismas se produce un deterioro del comportamiento a fatiga. Adicionalmente, Pérez et al (2009) diseñaron secciones de firme flexible para un volumen de tráfico medio o bajo, con unas vidas de servicio comparables a las de secciones diseñadas con materiales convencionales.

Desafortunadamente, las mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados tenían una mala adhesividad con un alto potencial para el fallo por desenvuelta. Estos investigadores consideran que se necesita más investigación, ya que esta mala adhesividad causa dudas sobre la durabilidad de las mezclas bituminosas conteniendo este tipo de residuos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de los Materiales Básicos

Los materiales básicos se ensayaron de acuerdo con las normas españolas NLT (Ministerio de Obras Públicas y Transporte, 2002) (Ensayos de carreteras) y las normas UNE-EN de la Asociación Española de Normalización y Certificación (2001). Las mezclas se diseñaron de acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, conocido como **PG-3** (Dirección General de Carreteras, 2002). La tabla 1 presenta los resultados de estos ensayos.

Tabla 1 Caracterización de los materiales básicos

Ensayo	Especificación	AN						AR
		Esquisto			Caliza			
		0/6	6/12	12/25	0/6	6/12	12/25	
Índice de lajas (%)	<35	--	17.2	19.4	--	11.3	14.6	34
Partículas fracturadas (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Equivalente de arena (%)	>50	85	--	--	66	---	---	67
Azul de metileno (g/kg)	--	0.22	--	--	0.25	---	---	--
Desgaste de L. Ángeles (%)	<30	--	--	22.1	--	---	24.1	34
Absorción de agua (%)	--	--	0.21	0.12	--	0.82	0.55	6.1
Ensayo	Especificación	Betún						
Penetración (0.1 mm)	50/70	69						
Punto de reblandecimiento (°C)	48/57	48.5						
Índice de penetración	+1/-1	-0.8						
Densidad (g/cm³)	--	1.03						

Áridos Naturales

Se utilizaron dos tipos de áridos naturales (AN). El primer tipo es un esquisto obtenido de una cantera en las fracciones 0/6, 6/12 y 12/25 mm. Estos áridos cumplen las especificaciones españolas (Tabla 1). El segundo tipo es una caliza dolomítica obtenida de otra cantera en las mismas fracciones, que también cumple también las especificaciones españolas (Tabla 1).

Áridos Reciclados

Los áridos reciclados (AR) se obtuvieron de una planta de reciclado ubicada en Madrid. Esta planta produce una zahorra artificial en la fracción 0/40 usada en caminos peatonales y pistas ciclistas. Está compuesta en porcentaje por los materiales siguientes: hormigón (73%), piedra (22%), diversos materiales bituminosos (4%) y cerámicos (1%). La tabla 1 muestra que el índice de lajas el equivalente de arena cumplen las especificaciones de PG-3. Además, todas las partículas son fracturadas. Sin embargo, no cumplen el valor requerido del coeficiente de Los Ángeles. El valor del coeficiente de absorción es 6.1%, mucho mayor que el de los áridos naturales.

Polvo Mineral

Como polvo mineral se utilizó cemento Portland. La superficie Blaine es de $3350 \text{ cm}^2/\text{g}$ y la gravedad específica es de 3.12 g/cm^3 .

Betún

El betún utilizado tiene una penetración igual a 69 y un punto de reblandecimiento de anillo y bola igual a 48.5°C . El índice Pfeiffer's es igual a -0.8 y la densidad es 1.03 g/cm^3 (Tabla 1). Se confirmó que cumple todas las especificaciones españolas.

Ensayos Mecánicos

Se eligió como material de capa de base una mezcla en caliente tipo **AC 22 base**. La Figura 1 muestra la curva granulométrica utilizada.

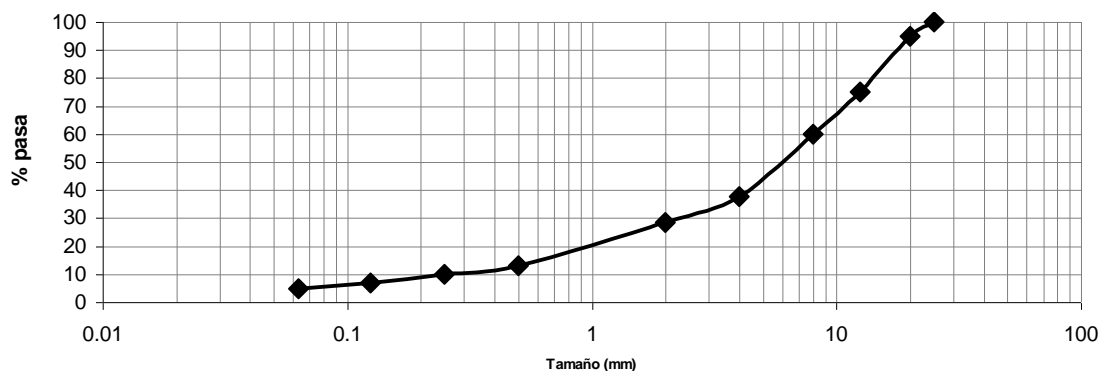


Figura 1 Curva granulométrica

En total se dosificaron 8 mezclas con la misma granulometría pero diferentes porcentajes de árido reciclado. Estos porcentajes de árido reciclado se emplearon en las fracciones más gruesas de las curvas granulométricas. En todos los casos se eliminaron mediante inspección visual los materiales cerámicos incorporados en el árido grueso. A continuación se enumeran las 8 mezclas dosificadas en el laboratorio:

- ☐ Cuatro mezclas utilizando esquisto como árido natural y con los % de árido reciclado siguientes: 0, 20, 40, 60%.
- ☐ Cuatro mezclas utilizando caliza como árido natural y con los % de árido reciclado siguientes: 0, 20, 40, 60%.

En las mezclas se utiliza una nomenclatura específica, en primer lugar, una letra mayúscula para indicar el tipo de árido natural: esquisto (**E**) o caliza (**C**), en segundo lugar, un número que indica el % de árido reciclado (0, 20, 40, 60%). Por ejemplo, la nomenclatura E-20 indica una mezcla que utiliza esquisto como árido natural y un 20% de árido reciclado.

Las dosificaciones de las mezclas se hicieron empleando el Método Marshall (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1992). Posteriormente, se elaboraron 8 series de seis probetas cada una con el fin de determinar su sensibilidad al agua. Los especímenes se elaboraron con el porcentaje óptimo de betún (**B_o**) seleccionado del ensayo Marshall. La compactación de las probetas se realizó mediante 50 golpes por cara utilizando los moldes y el compactador del ensayo Marshall. La temperatura de ensayo de las probetas fue de 15° C. En esta ocasión el ensayo se realizó siguiendo la norma europea EN-12697-12 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2004). La relación de resistencia a tracción indirecta se obtiene dividiendo el promedio de la resistencia de una serie de tres especímenes acondicionados que fueron sumergidos en agua a 40° C durante tres días entre el promedio de las resistencias de una serie de tres especímenes mantenidos en aire a una temperatura de 20° C (Ecuación 1). Ya que es un ensayo de tracción indirecta, la relación se denomina Relación de Resistencia a Tracción Indirecta (**ITSR**), y se expresa como un porcentaje.

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_D} \times 100 \quad (1)$$

Donde **ITS_w** = promedio de las resistencias a tracción indirecta de las probetas mojadas (MPa), **ITS_D** = promedio de las resistencias a tracción indirecta de las probetas secas (MPa). En España, en las capas de base de mezclas bituminosas en caliente, los valores del **ITSR** deben ser superiores al 80%.

Análisis de la Varianza

El análisis de la varianza (**ANOVA**) proporciona al investigador una técnica estadística capaz de producir modelos significativos sobre la importancia de los factores estudiados en un experimento.

En esta comunicación se realizó un **ANOVA** de tres vías. Para ello, se seleccionó el programa Statgraphics (Statistical Graphics Corporation, Rockville, MD, USA) para investigar el efecto de los tres factores y la interacción entre ellos. La variable independiente es la resistencia a tracción indirecta. Los tres factores son: estado de humedad (seco, mojado), tipo de árido natural (esquisto, caliza) y el porcentaje de árido reciclado (0%, 20%, 40% y 60%). El estado de humedad y el tipo de árido natural son variables cualitativas mientras que el porcentaje de árido reciclado es una variable cuantitativa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 están reflejadas la densidad relativa de los áridos en aceite de parafina (G_{sb}). También, los contenidos de betún óptimo (B_o) utilizados para la fabricación de las probetas para el ensayo de sensibilidad al agua. Asimismo, se reflejan los parámetros Marshall correspondientes a los B_o .

De acuerdo con los resultados de la tabla 2, en principio, se cumplen las especificaciones del **PG-3** español, para mezclas bituminosas en caliente utilizadas en capas de base de carreteras con la categoría de tráfico pesado **T3**. La categoría de tráfico **T3** se corresponde con el intervalo de intensidades medias diarias de tráfico pesado siguiente: $50 \leq IMD_p < 200$.

Las probetas fabricadas con áridos reciclados presentan valores de huecos en áridos (**VMA**) mayores. Se ve claramente que a medida que se incrementa el % de árido reciclado de las mezclas se aumenta el **VMA**. Así, las mezclas fabricadas con áridos reciclados tienden a requerir un mayor % de B_o que las mezclas fabricadas solamente con áridos naturales. Este comportamiento se produce tanto en las mezclas fabricadas con áridos reciclados y áridos naturales de esquisto; como en las mezclas elaboradas con áridos reciclados y áridos naturales de caliza.

Tabla 2 Parámetros Marshall

Mezcla	Parámetros del ensayo Marshall							
	G_{sb}	B_o (%)	VMA (%)	Va (%)	VFA (%)	F (mm)	S (kN)	D (g/cm ³)
E-0	2.66	4.5	14.5	5.0	66.8	2.3	10.5	2.36
E-20	2.63	5.0	15.5	5.0	69.6	2.4	11.0	2.33
E-40	2.59	5.5	17.0	5.0	69.1	2.4	11.0	2.27
E-60	2.57	5.5	17.0	5.5	67.0	2.6	12.2	2.26
C-0	2.75	4.0	14.0	5.0	71.0	2.3	10.2	2.45
C-20	2.70	4.3	15.0	5.0	65.5	2.4	11.2	2.39
C-40	2.63	4.5	16.5	7.0	62.1	2.7	11.2	2.30
C-60	2.56	4.8	16.0	6.0	63.3	2.7	12.2	2.26
Especificación	--	Min. 3.5	≥ 14	5-9	---	2-3.5	>10	--

Asimismo, obsérvese que las densidades de las mezclas disminuyen al incrementarse el % de árido reciclado. Las densidades de las mezclas que incorporan áridos calizos son mayores debido a que los valores del G_{sb} de estos áridos son mayores. Esto se manifiesta en que las mezclas que contienen áridos naturales de caliza tienen unos menores valores del **VMA** que las mezclas que incorporan áridos naturales de esquisto y, por tanto, son necesarios unos menores % de B_o .

De estos resultados se deduce que las mezclas fabricadas con áridos reciclados tienen más **VMA** que las mezclas con solamente áridos naturales. Este mayor % de **VMA** posiblemente se deba al mortero adherido a los áridos reciclados provenientes de la demolición de elementos estructurales fabricados con hormigón y a diversas impurezas: yesos, ladrillos, etc., incorporados en los Residuos de Construcción y Demolición. Todo esto se manifiesta en una mayor absorción de agua. Además, obsérvese que en la tabla 2 se observa una cierta tendencia de aumento de la estabilidad (**S**) de las mezclas a medida que se incrementa el % de áridos reciclado de las mismas.

Por otro lado, en la tabla 3 pueden observarse los resultados de las resistencias de 48 probetas ensayadas a tracción indirecta. La tabla está subdividida de acuerdo a los factores siguientes:

- ☐ Porcentaje de árido reciclado: 0, 20, 40, 60%.
- ☐ Tipo de árido: Esquisto y caliza dolomítica.
- ☐ Estado de humedad de las probetas: mojado y seco.

Tabla 3 Resistencias a tracción indirecta (MPa)

% AR	Especimen	Tipo de árido natural			
		Esquisto		Caliza	
		Estado		Estado	
		Mojado	Seco	Mojado	Seco
0	Réplica 1	0.99	1.19	0.79	0.78
	Réplica 2	0.97	0.91	0.72	0.90
	Réplica 3	0.91	1.18	0.85	0.79
	Promedio	0.96	1.09	0.79	0.82
	ITSR (%)	88 (E-0)		96 (C-0)	
20	Réplica 1	0.89	1.04	0.93	1.27
	Réplica 2	0.81	1.32	1.02	1.05
	Réplica 3	0.84	1.30	0.84	0.93
	Promedio	0.85	1.22	0.93	1.08
	ITSR (%)	70 (E-20)		86 (C-20)	
% AR	Especimen	Tipo de árido natural			
		Esquisto		Caliza	
		Estado		Estado	
		Mojado	Seco	Mojado	Seco
40	Réplica 1	0.78	1.25	0.65	1.16
	Réplica 2	0.87	1.33	0.84	1.23
	Réplica 3	0.92	1.40	0.79	1.30
	Promedio	0.86	1.33	0.76	1.23
	ITSR (%)	65 (E-40)		62 (C-40)	
60	Réplica 1	0.86	1.25	0.80	1.46
	Réplica 2	0.77	1.45	0.76	1.65
	Réplica 3	0.86	1.48	0.85	1.55
	Promedio	0.83	1.39	0.80	1.55
	ITSR (%)	60 (E-60)		52 (C-60)	

Esta configuración (que coincide con los factores del **ANOVA** explicado más adelante) permite ver las **ITSR** de las probetas de los 8 tipos de mezclas bituminosas. A continuación se explican los resultados:

- ☐ Como era previsible en la mezcla S-0, que utiliza un 100% de árido natural de esquisto, el resultado de la **ITSR** es alto, un 88%, superando el umbral mínimo del 80% que exigen las especificaciones españolas para una mezcla bituminosa en caliente en capa de base. Las mezclas S-20; S-40 y S-60 que utilizan un 20%, 40% y 60% de árido reciclado ofrecen unas **ITSR** del 70%, 65% y 60% respectivamente, no superando dicho umbral.
- ☐ También era previsible la **ITSR** del 96% obtenido en la mezcla C-0, que utiliza un 100% de árido natural de caliza dolomítica. Asimismo, en la mezcla C-20 el resultado de la **ITSR** es

satisfactorio con un valor del 86%. Las **ITSR** de las mezclas C-40 y C-60 son menores, un 62% y un 52%, respectivamente.

Estos resultados parecen coherentes. En todas las mezclas a medida que se va incrementando el % de árido reciclado, debido a la pérdida de adhesividad, se produce una disminución de los valores del las **ITSR**. Por otro lado, en las en las mezclas C-0 y C-20 se obtienen unas mayores **ITSR** debido a los áridos naturales de tipo calizo que proporcionan una mejor adhesividad. No obstante, como en las mezclas C-40 y C-60, cuando se reduce el % de árido naturales se produce un decremento de las **ITSR**.

Por otra parte, en la tabla 3 se puede observar que las **ITS_D** de las probetas (en estado seco) tienden a incrementarse al aumentar el % de árido reciclado; mientras que esto no sucede así en las **ITS_w** de las probetas (en estado mojado). Posiblemente, este hecho se deba al mortero de cemento adherido a los áridos reciclados, que da una mayor resistencia a las mezclas en estado seco. Este comportamiento concuerda con la tendencia de incremento de las estabilidades Marshall conforme se aumentan los % de árido reciclado (Tabla 2).

En la tabla 4 puede observarse los resultados del **ANOVA** de tres vías con interacción. El modelo explica un 90% de la varianza total. Los tres efectos principales son estadísticamente significativos para un 95% de nivel de confianza. Tal y como se esperaba, el efecto principal más importante es el estado de humedad. Este efecto explica un 53.16% de la varianza total ($p=0.000$). También, los efectos principales % de árido reciclado ($p=0.000$) y tipo de árido natural ($p=0.021$) son significativos. No obstante, el efecto % de árido reciclado tiene una importancia mucho mayor, ya que explica un 10.41% de la varianza total; mientras que el efecto del tipo de árido natural solo explica un 1.83%.

En las interacciones de segundo orden (Tabla 4), la interacción entre el % de árido reciclado y el estado de humedad es significativa ($p=0.000$), explicando un 18.01% de la varianza total. Esto se refleja en el muy diferente comportamiento de las probetas en estado seco y en estado húmedo para los diferentes porcentajes de áridos reciclados. Las resistencias de las probetas en estado seco se incrementan con el porcentaje de árido reciclado; mientras que las resistencias de las probetas en estado húmedo no se incrementan. La interacción entre el % de árido reciclado y el tipo de árido natural es, también, significativa, aunque en menor medida ($p=0.009$), pues solamente explica un 4.24% de la varianza total. En tabla 3 se muestra el diferente comportamiento de las probetas fabricadas con el árido natural calizo y el árido natural de esquisto. Puede verse que las resistencias de las probetas con árido natural calizo siempre son menores, excepto para el 60% de árido reciclado en el que la resistencia del árido natural de esquisto es mayor. Por último, no existe interacción entre el tipo de árido natural y el estado de humedad ($p=0.566$), pues solo explica un 0.10% de la varianza total. Nótese que las **ITS** de los áridos naturales de caliza y de áridos naturales de esquisto se incrementan en la misma proporción al pasar del estado mojado al estado seco.

En la tabla 5 está expuesto un contraste múltiple de rangos de resistencias según el procedimiento de las menores diferencias significativas de Fisher (**LSD**). En dicha tabla puede observarse que en los niveles del % de árido reciclado se forman tres grupos homogéneos, no habiendo diferencias significativas entre las resistencias de las probetas fabricadas con el 20% y el 40% de árido reciclado. Además, existe una diferencia significativa entre las resistencias de las probetas

elaboradas con árido natural de esquisto de las elaboradas con árido natural de caliza. Asimismo, hay una diferencia significativa entre las resistencias de las probetas en estado seco y en estado mojado.

Del **ANOVA** se puede deducir que, como es lógico, el estado de humedad es el factor que más influye en las resistencias de las probetas. El estado de humedad está involucrado en un 73.52% de la varianza total. Por tanto, parece que el efecto producido tanto por el % de árido reciclado como por el tipo de árido natural sobre las resistencias debe ser diferente dependiendo del estado de humedad (seco o mojado). En este sentido, al incrementarse el % de árido reciclado se incrementan significativamente las **ITS** de las probetas en estado seco; mientras que esto no sucede en el estado mojado, sino que más bien las resistencias tienden a disminuir. Parece que este mal comportamiento se deba al mortero de cemento adherido a los áridos reciclados de hormigón. El mortero hace que las probetas de mezclas bituminosas en caliente sean mucho más resistentes en estado seco. Sin embargo, en estado mojado las resistencias de las probetas son mucho más bajas debido a la alta absorción y a la fácil separación del mortero adherido a los áridos reciclados de hormigón.

Tabla 4 ANOVA de tres vías con interacción

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	GL	% Total SC	Media cuadrática	F	p
Efectos principales						
% de árido reciclado	0.319	3	10.41	0.106	11.11	0.000
Tipo de árido natural	0.056	1	1.83	0.056	5.88	0.021
Estado	1.629	1	53.16	1.629	170.33	0.000
Dobles interacciones						
% de AR-Tipo de AN	0.1305	3	4.24	0.043	4.55	0.009
% de AR-estado	0.552	3	18.01	0.184	19.24	0.000
Tipo de AN-estado	0.003	1	0.10	0.003	0.34	0.566
Triple interacción						
% de AR-estado- Tipo de AN	0.069	3	2.25	0.023	2.41	0.085
Residuos	0.306	32	9.99	0.009		
Total	3.065	47	100.00			

Tabla5 Análisis múltiple de tres factores

Factor	Nivel	Conteo	Media LS	Grupos homogéneos*		
				% de RA	Tipo de AN	Estado
% de RA	0	12	0.92	x		
	20	12	1.02	x		
	40	12	1.05	x		
	60	12	1.14	x		
Tipo de AN	Esquisto	24	1.07		x	
	Caliza	24	0.99		x	
Estado	Mojado	24	0.85			x
	Seco	24	1.21			x

*Columnas en verticales distintas indican una diferencia estadística significativa al 95%

Para confirmar estas aseveraciones sería necesario hacer una caracterización microscópica de las mezclas bituminosas hechas con áridos reciclados. En este sentido, se puede obtener información sobre las mezclas bituminosas, señales de degradación de los áridos, distribución del polvo mineral, homogeneidad de la matriz betún/polvo mineral, adhesividad entre los áridos y el betún, señales de desenvuelta, etc. Además, está todavía pendiente la utilización de betunes activados que permitan mejorar la adhesividad de estas mezclas. Finalmente, se deben realizar muchos más ensayos con un mayor número de probetas para que los resultados sean todavía más representativos y significativos.

CONCLUSIONES

De esta investigación se deducen las conclusiones siguientes:

- ☐ Los áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición producen un incremento de la resistencia a tracción indirecta cuando las probetas están en estado seco.
- ☐ Los áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición producen una disminución de la resistencia a tracción indirecta tras inmersión de las probetas en agua.
- ☐ Las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición tienen una mala sensibilidad al agua.
- ☐ Hasta que no se encuentre solución a los problemas mencionados en los dos puntos anteriores, estos áridos reciclados no son susceptibles de ser utilizados en mezclas bituminosas en caliente de firmes de carreteras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo recibido a la hora de realizar esta investigación por parte del Ministerio de Educación y Ciencia de España a través del Plan Nacional de I+D+I.

REFERENCIAS

- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2001). Manual de normas técnicas UNE-EN. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2004). Norma UNE-EN 12697-12. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayos para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezclas bituminosas. Madrid, España.
- Bennert, T., Papp, W., Maher, A., and Gucunski, N. (2000). Utilization of construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications. *Transportation Research Record* No 1714, p. 33-39.
- Cross, S.A., Abou-Zeid, M.N., Wojerkowski, J.B., and Fager, G.A. (1996). Long-Term Performance of Recycled Portland Cement Concrete Pavement. *Transportation Research Record* No 1525, p. 115-123.

- Dirección General de Carreteras. (2002). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3. Ediciones Liteam, Madrid, España.
- Hansen, T.C. (1992). Recycling of Demolished Concrete and Masonry. Report of Technical Committee 37-Drc Demolition and Reuse of Concrete (RILEM Report No 6), Spon E&FN, UK.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (1992). NLT-159. Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall. Ensayos de carreteras. Segunda edición, Madrid, España.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2002). Normas NLT. Ensayos de carreteras. Dirección General de Carreteras, segunda edición, Madrid, España.
- Poon, C.S., and Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, Vol. 20, p. 578-585.
- Pérez, I., Toledano, M., Gallego, J., Taibo, J. (2007). Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed constructions and demolition debris. *Materiales de Construcción*. Vol. 57, No 285, p. 17-29.
- Pérez, I., Toledano, M., Gallego, J. Viability of the use of Construction and Demolition Debris in Hot Mix Asphalt. Eight International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. The University of Illinois at Urbana-Champaign. June 29-July 2, USA, 2009.
- Rahshir, S., and Barai, S.V. (2006) Studies on Recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research*, Vol. 24, p. 225-233.